

B. WEINZIERL, A. DIEHL

# 21 Warnung vor Vulkanasche: Was haben wir aus den isländischen Vulkanausbrüchen 2010 und 2011 gelernt?

Warning of volcanic ash: What have we learned from the volcanic eruptions in Iceland in 2010 and 2011?

## Zusammenfassung

Vulkanasche war in der Flugmeteorologie in Mitteleuropa bis zum Ausbruch des Eyjafjallajökull 2010 (Island) kein großes Thema. Die im Frühjahr 2010 von Island nach Südosten über Mitteleuropa driftende Vulkanasche führte in Konsequenz von damals gültigen Richtlinien zu beispiellosen Einschränkungen im Luftverkehr. In der Folge entwickelte sich eine starke Dynamik zu notwendigen Maßnahmen und Regelungen zur frühzeitigen Erkennung und angemessenen Bewertung derartiger Ereignisse. Dieser Artikel präsentiert einen retrospektiven Blick auf die isländischen Vulkanausbrüche 2010 und 2011, stellt das viel diskutierte Konzept von „Visible Ash“ vor und schildert die nationalen und internationalen Fortschritte bei der Beobachtung und Vorhersage von Vulkanasche seit 2010.

## Summary

Before the eruption of Eyjafjallajökull in spring 2010, volcanic ash was not considered an issue in aviation meteorology in Central Europe. During the Eyjafjallajökull eruption, the prevailing meteorological conditions led to the fast transport of volcanic ash towards central Europe. The presence of volcanic ash in the airspace over Europe caused very extensive restrictions to aviation which were the logical consequence of international regulations valid at that time. As a consequence of the volcanic eruption in 2010, there was the need to develop new procedures and regulations for an appropriate response to future volcanic eruptions. In this article, we give a retrospective view on the volcanic eruptions in Iceland in 2010 and 2011, present the concept of “Visible Ash” and summarize the national and international progress in the monitoring and forecasting of volcanic ash since 2010.

## 1 Einleitung

Vulkanausbrüche sind nicht nur ein beeindruckendes Naturschauspiel, sondern Vulkanascheschichten in der Atmosphäre können eine erstzunehmende Gefährdung für den Luftverkehr darstellen. Vulkanasche enthält neben kristallinen Silikatbestandteilen auch glasartiges Material, das seine Materialeigenschaften unter dem Einfluss von Hitze verändert. Der Übergang von festen zu zähflüssigen Materialeigenschaften findet bei Vulkanasche schon bei Temperaturen von 700 bis 800 °C statt, die in Flugzeugtriebwerken erreicht werden (CASADEVALL 1993, DINGWELL 1996, KUEPPERS et al. 2010, LAVALLÉE et al. 2012). Der Einfluss in Vulkanasche ist

dadurch wesentlich kritischer als als der Einfluss in Wüstenstaubschichten, die hauptsächlich aus Quarz bestehen (Schmelztemperatur von 1650 °C). Durch Vulkanasche können Höhen- und Geschwindigkeitsmesser beschädigt, Windschutzscheiben zerkratzt, Hydraulikflüssigkeiten im Flugzeug kontaminiert oder die Kühlluftbohrungen in Triebwerken verstopft werden, was im schlimmsten Fall zum Ausfall eines oder mehrerer Triebwerke führt.

In den vergangenen 60 Jahren flogen mehr als 120 Flugzeuge unabsichtlich durch Ascheschichten von explosiven Vulkanausbrüchen wie des Pinatubo (1991, Philippinen) oder Mount Redoubt (1989/90, Alaska). Dabei traten in 79 Fällen verschiedene Grade von Flugzeug-



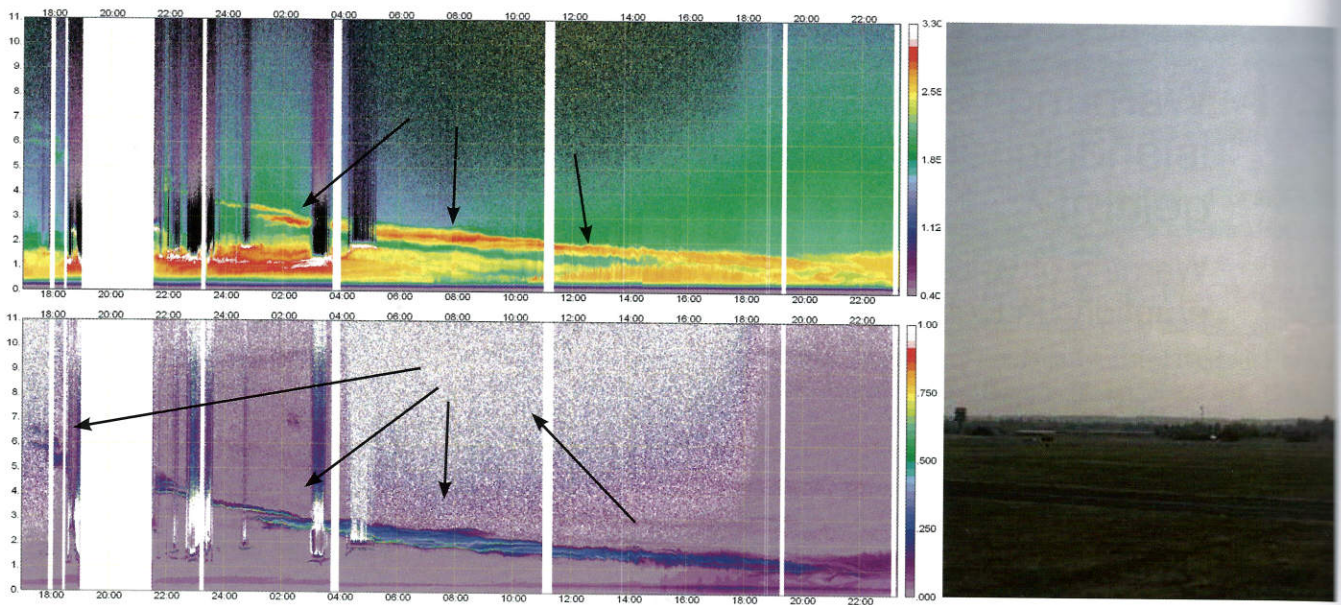


Abb. 21-1: Links: Ergebnisse aus Lidarmessungen (532 nm) des Meteorologischen Institutes der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München am 16. und 17. April 2010. Im oberen Lidarbild ist das entfernungskorrigierte Lidarsignal dargestellt, in der unteren Abbildung das lineare Volumendepolarisationsverhältnis. Rechts: Foto der Vulkanascheschicht am Lidarstandort München-Maisach am 17. April um 11:55 UTC. Aufgrund des Vorhandenseins der Vulkanasche ist der Himmel nicht mehr blau sondern gräulich. Lidarbild modifiziert aus GROSS et al. (2012), Foto: Silke Groß/Volker Freudenthaler.

und Triebwerkschäden auf und in neun Fällen fielen ein oder mehrere Triebwerke aus (GUFFANTI et al. 2010). Neben den sofort sichtbaren Triebwerksausfällen, kann es auch schleichend auftretende Schäden geben, die primär auf die ätzende Wirkung von Schwefeldioxid zurückzuführen sind. Die Gefährdung von Flugzeugen durch Vulkanasche hängt von vielen Parametern ab. Hierzu gehören außer der Massenkonzentration der Vulkanasche, der Triebwerkstyp und der Flugzustand (Start/Landung/Reiseflug), aber auch die Zeit, die ein Flugzeug in einer Ascheschicht verbringt (Aschedosis). Es ist daher schwierig, eindeutige Grenzwerte für „sicheres Fliegen in Vulkanasche“ festzulegen.

Nach den eklatanten Zwischenfällen bei Flügen durch Vulkanasche in den 1980er Jahren, wurden in den 1990er Jahren insgesamt neun *Volcanic Ash Advisory Centers* (VAAC) in Anchorage, Buenos Aires, Darwin, London, Montreal, Tokio, Toulouse, Washington und Wellington als Teil der nationalen Wetterdienste gegründet. Aufgabe der VAACs ist es, Informationen zu aktuellen Vulkanausbrüchen zu sammeln, Zugbahnen von Ascheschichten zu berechnen und vor potentiell gefährlichen Ascheschichten in der Atmosphäre zu warnen. Dabei ist das London VAAC für den Nordatlantik und das Nordmeer zuständig und das Toulouse VAAC für Afrika und Europa.

Eine weitere Reaktion auf die Vulkanaschezwischenfälle in der Luftfahrt war die Schlussfolgerung, dass maximale Flugsicherheit nur durch die Vermeidung von aschekontaminierten Lufträumen gewährleistet werden kann (CASADEVALL 1993, ICAO 2001). Die Internationale Zivilluftfahrtorganisation ICAO (*International Civil Aviation Organization*) empfahl deswegen, unab-

hängig von der Aschemassenkonzentration, kontaminierte Lufträume unbedingt zu umfliegen (ICAO 2001, 2007). Im Speziellen wurde angeregt „Visible Ash“, also für das menschliche Auge sichtbare Vulkanaschegebiete, zu meiden.

Vulkanausbrüche sind insbesondere am so genannten „Ring-of-fire“ um den Pazifik keine Seltenheit. Weltweit gibt mehr als 1500 aktive Vulkane. Obwohl global etwa 50 bis 70 Vulkane pro Jahr ausbrechen (etwa ein Ausbruch pro Woche, SIEBERT et al. 2010), konnte sich vor dem Ausbruch des isländischen Vulkans Eyjafjallajökull im Frühjahr 2010 niemand vorstellen, dass ein im Vergleich zu den Ausbrüchen des Mount St. Helens (1980) oder des Pinatubo (1991) mittelstarker Vulkanausbruch zu den weitreichendsten Luftraumsperrungen in Europa nach dem Ende des zweiten Weltkrieges führen würde. Im Zuge der „Eyjafjallajökull-Aschekrise“ war der Luftraum über Europa teilweise länger als sechs Tage geschlossen, mehr als 100.000 Flüge wurden gestrichen und mehr als 10 Millionen Passagiere waren betroffen (SCHUMANN et al. 2011). Von den Luftfahrtunternehmen und der Industrie, die mit reduzierten Transportkapazitäten und dadurch verlangsamter Produktion zu kämpfen hatten, wurden die Luftraumsperrungen zum Teil heftig kritisiert. Einer der Hauptkritikpunkte war, dass Luftraumsperrungen nur auf Modellvorhersagen basieren und keine Messungen der Vulkanaschekonzentration in der Atmosphäre durchgeführt würden.

Im den nachfolgenden Kapiteln geben wir einen Überblick über die Messungen während des Eyjafjallajökull-Vulkanausbruches und stellen das Konzept von „Visible Ash“ vor, das nach dem Ausbruch des Eyjafjallajökull als zusätzliches Sicherheitskonzept in der Luftfahrt vorge-



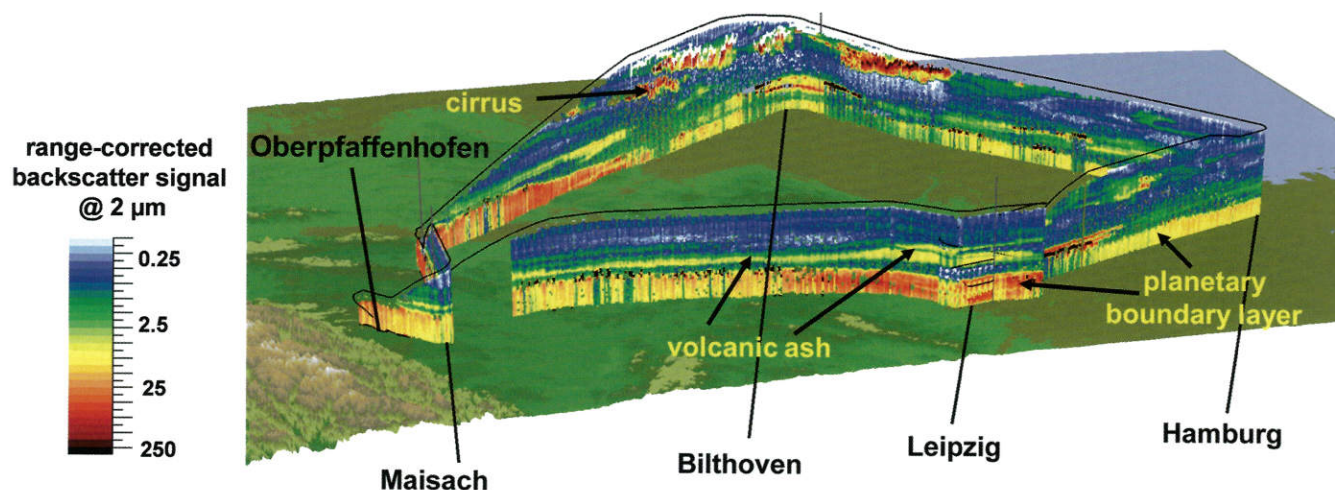


Abb. 21-2: Ergebnisse aus Lidarmessungen auf dem DLR-Forschungsflugzeug Falcon (farbcodiert) am 19. April 2010 zeigen entlang des Flugweges von Oberpfaffenhofen über Maisach, Leipzig, Hamburg, Bilkthoven zurück nach Oberpfaffenhofen eine 0,5 bis 2,0 km mächtige Ascheschicht in einer Höhe zwischen 4 und 6 km über Grund (gelb). Abbildung modifiziert aus SCHUMANN et al. (2011).

schlagen wurde. Nach einer kritischen Diskussion über die Schwierigkeit einen Grenzwert für sichtbare Asche zu definieren und einem retrospektiven Blick auf die isländischen Vulkanausbrüche 2010 und 2011, fassen wir die aktuelle Vorgehensweise zur Herausgabe von Vulkanaschevorhersagen und Warnungen im DWD zusammen und geben einen Ausblick auf zukünftige Herausforderungen im Umgang mit Vulkanausbrüchen.

## 2 Der Eyjafjallajökull Vulkanausbruch 2010 und die Diskussion über Vulkanaschegrenzwerte

Im Gegensatz zur öffentlichen Wahrnehmung war der Ausbruch des Eyjafjallajökull im Frühjahr 2010 nicht unerwartet: schon ab April 2009 verzeichneten Vulkanologen eine Zunahme des seismischen Tremors. Ab Februar/März 2010 wurde eine große Anzahl von Erdbeben in der Nähe des Eyjafjallajökull detektiert und eine erste Eruption ereignete sich am 20. März 2010. Der Ausbruch, der ganz Europa beeinflusste, begann am 14. April 2010. Infolge der ICAO-Empfehlung zur Vermeidung von aschekontaminierten Lufträumen wurden ab 15. April 2010 weite Teile des europäischen Luftraumes geschlossen. Abbildung 21-1 zeigt die Eyjafjallajökull-Ascheschicht

über München. Die Messungen beginnen am 16. April 2010 um 17 Uhr und enden am 17. April 2010 um 22 Uhr. Im Lidarbild sieht man die Ankunft der Ascheschicht am 16. April über München in einer Höhe zwischen 6,5 bis 7,5 km gegen 17:30 Uhr (lineare Volumendepolarisation  $> 0,25$ ). Die Vulkanascheschicht ist nur 0,5 bis 1,0 km mächtig und sinkt von etwa 7 km Höhe bis in die Grenzschicht unterhalb von 2 km ab.

Messungen des DLR-Forschungsflugzeuges Falcon auf der Strecke Oberpfaffenhofen-Leipzig-Hamburg-Ca-bauw-München-Oberpfaffenhofen am 19. April 2010 (Abbildung 21-2) und Messungen von zahlreichen europäischen Lidarkollegen zeigen ebenfalls eine 0,5 bis 2,0 km mächtige Ascheschicht zwischen 4 und 6 km Höhe (siehe zum Beispiel ANSMANN et al. 2010, FLENTJE et al. 2010, GASTEIGER et al. 2011, SCHUMANN et al. 2011, GROSS et al. 2012, WEINZIERL et al. 2012b, WIEGNER et al. 2012, PAPPALARDO et al. 2013). Über Leipzig wurde die maximale Aschemassenkonzentration mit Werten von  $1,0 [0,65-1,35] \text{ mg m}^{-3}$  am 16. April 2010 erreicht (ANSMANN et al. 2010), wohingegen das Maximum über München mit Werten von  $1,1 [0,65-1,8] \text{ mg m}^{-3}$  am 17. April 2010 detektiert wurde (GASTEIGER et al. 2011). Flugzeugmessungen mit dem DLR-Forschungsflugzeug Falcon am 19. April 2010 zeigten über Leipzig und München Aschemassenkonzentrationen von  $0,05 [0,03-0,11] \text{ mg m}^{-3}$  (SCHUMANN et al. 2011). Bei der Bestimmung der Aschemassenkonzentration ist es wichtig, dass Partikel im Größenbereich oberhalb von  $1 \mu\text{m}$  zuverlässig detektiert werden, da diese Partikel die Aschemassenkonzentration dominieren. Auf dem Forschungsflugzeug Falcon werden Partikel bis zu Größen von 1 bis  $2 \mu\text{m}$  durch sogenannte isokinetische Einlässe in das Flugzeug geleitet und dort mit verschiedenen Messinstrumenten analysiert. Partikel oberhalb von  $1 \mu\text{m}$  gelangen bei typischen Falcon-Fluggeschwindigkeiten von etwa  $180 \text{ ms}^{-1}$  nicht oder nur mit großen Verlusten ins Flugzeug und werden deswegen mit optischen Sensoren unter den Flugzeugflügeln detektiert (siehe Abbildung 21-3).

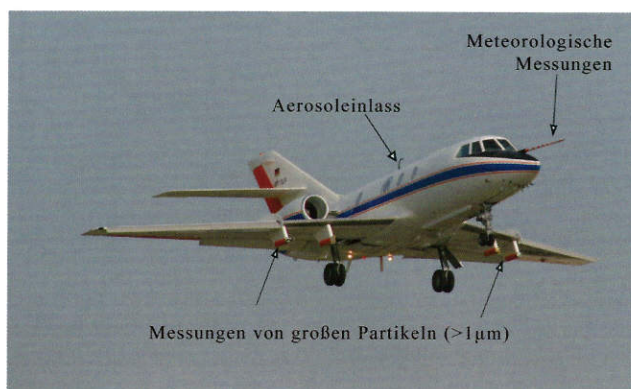


Abb. 21-3: Das DLR-Forschungsflugzeug Falcon 20-E. Unter den Flügeln befinden sich die Instrumente zur Detektion der großen ( $> 1 \mu\text{m}$ ) Partikel.



Bezeichnung	Aschemassenkonzentration	Anmerkung	Warnungen
Zone ohne Kontaminierung	$< 0,2 \text{ mg m}^{-3}$		Keine Auswirkungen und Meldungen
Potentiell kontaminierte Zone ( <i>Low Contaminated Area</i> bzw. <i>Enhanced Procedure Zones</i> , EPZ).	$0,2\text{-}2 \text{ mg m}^{-3}$	$2 \text{ mg m}^{-3}$ wurde von einigen Triebwerksherstellern als maximal tolerierbarer Wert für den kontinuierlichen Betrieb bezeichnet (Bericht der UK CAA am 20. April 2010).	Volcanic Ash Advisories durch die VAACs <sup>1</sup> und SIGMETs VA <sup>3</sup> von den MWO Stellen.
Zone mit mäßiger Vulkanaschekonzentration ( <i>Medium Contaminated Area</i> bzw. <i>Time Limited Zones</i> , TLZ)	$2\text{-}4 \text{ mg m}^{-3}$		In Deutschland: Warnungen vor mäßigen Konzentrationen als VA-NOTAM <sup>2</sup> .
Zone mit hoher Vulkanaschekonzentration ( <i>High Contaminated Area</i> bzw. <i>Temporary Dangerous Zones</i> , TDZ)	$> 4 \text{ mg m}^{-3}$ („No Fly Zone“)	Von den Behörden in Großbritannien wurde dazu festgestellt, dass sie Informationen haben wonach Konzentrationen bis zu $4 \text{ mg m}^{-3}$ tolerabel für ein Flugzeugtriebwerk sind.	In Deutschland: Warnungen vor hohen Konzentrationen als VA-NOTAM.

Tabelle 21-1: In Deutschland gültige Vulkanaschegrenzwerte und die damit verbundenen Maßnahmen. In Deutschland sind Flüge in gemäß SIGMET und NOTAM mäßig ( $2\text{-}4 \text{ mg m}^{-3}$ ) und stark ( $> 4 \text{ mg m}^{-3}$ ) kontaminierten Lufträumen verboten. Ausnahmen und Erklärungen siehe Text.

Um den unbeschränkten Luftraum während der explosiven Phase des Eyjafjalla-Ausbruches zu maximieren, wurden Ende April 2010 vorläufige Vulkanaschegrenzwerte empirisch festgelegt (SCHUMANN et al. 2011). Im Mai 2011 nach dem Ausbruch des isländischen Vulkanes Grimsvötn wurden diese Grenzwerte vom damaligen Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) verbindlich für Deutschland festgelegt (BMVBS 2011, siehe auch Tabelle 21-1). Nach diesen Vulkanaschegrenzwerten ist es erlaubt, in Gebieten mit einer Aschemassenkonzentration unterhalb von  $0,2 \text{ mg m}^{-3}$  ohne Einschränkungen zu fliegen. Beim Durchflug durch Gebiete mit Aschemassenkonzentrationen zwischen  $0,2$  und  $2 \text{ mg m}^{-3}$  müssen spezielle Wartungsprozeduren angewendet werden. Sind Lufträume gemäß SIGMET<sup>1</sup> oder NOTAM<sup>2</sup> mäßig ( $2\text{-}4 \text{ mg m}^{-3}$ ) oder stark ( $> 4 \text{ mg m}^{-3}$ ) mit Vulkanasche kontaminiert, sind in Deutschland Flüge verboten.

Ausgenommen davon sind Flüge, bei denen der Luftfahrzeugführer eine Notlage erklärt hat oder bei denen eine Notlage offensichtlich ist, Flüge von Streitkräften, Such- und Rettungseinsätze, Forschungsflüge, Flüge von Luftfahrzeugen mit Kolbenmotoren oder ohne Motorantrieb. Darüber hinaus dürfen Flüge von turbinengetriebenen Luftfahrzeugen in mit Vulkanasche mäßig ( $2$  bis  $4 \text{ mg m}^{-3}$ ) kontaminierten Lufträumen nach einer Risikobewertung des Luftfahrtunternehmens, welche vom jeweiligen Triebwerkshersteller

mitgetragen wird und vom Luftfahrtbundesamt als ausreichend anerkannt wurde, durchgeführt werden (siehe auch BMVBS 2011). Abbildung 21-4 zeigt ein Beispiel für die



Modelled Ash Concentration from FL000 to FL200 at  
0600 UTC 25/05/2011  
Issue time: 201105241200

This is a guidance product generated from model data and is supplemental to the official VAAC London Volcanic Ash Advisory and Volcanic Ash Graphic products. FIR boundaries are indicated for reference

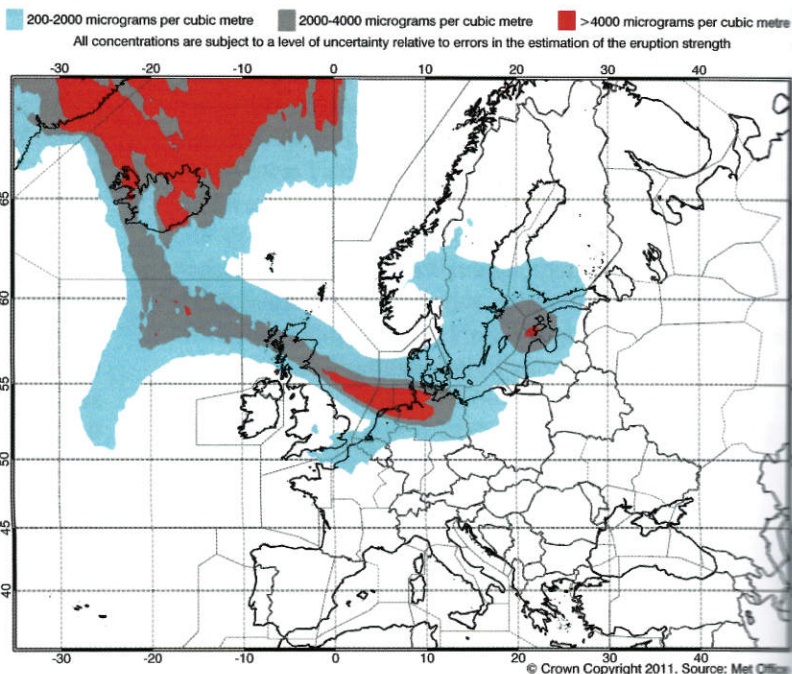


Abb. 21-4: Modellerte Ascheverteilung zwischen Flight Level (FL) FL000 und FL200 (Erdoberfläche bis etwa 6000 m) für 06 UTC am 25.05.2011 unter Berücksichtigung der neuen Grenzwerte für Vulkanasche. Zonen mit hoher Konzentration sind rot, Gebiete mit mäßiger Konzentration grau und potentiell kontaminierte Zonen sind türkis markiert. Quelle: MetOffice zum Ausgabezeitpunkt 24.5.2011, 12 UTC, im Internet.

SIGMET (*Significant Meteorological Phenomena*) sind Warnungen für die Luftfahrt und informieren über potentiell gefährliche Wettererscheinungen, welche die Sicherheit des Luftverkehrs beeinträchtigen können. Sie werden von den Flugwetterüberwachungsstellen (MWO) für die zugeordneten Fluginformationsgebiete



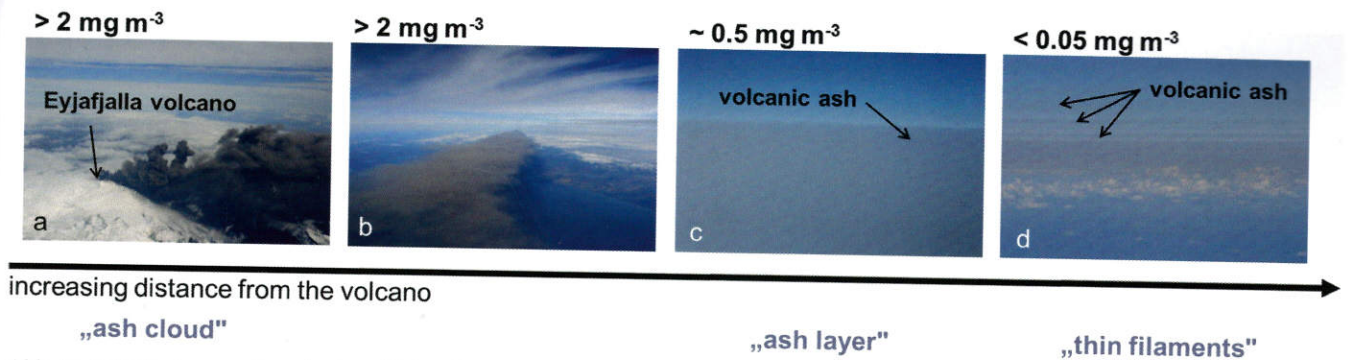


Abb. 21-5: Veränderung einer Ascheschicht mit zunehmender Entfernung vom Vulkan. Die Fotos auf der linken Seite (a, b) wurden nahe des Eyjafjallajökull-Vulkans in Island aufgenommen. Die Fotos auf der rechten Seite wurden über der Nordsee (c) beziehungsweise über Großbritannien (d) mehr als 1500 km vom Vulkan entfernt aufgenommen. Abbildung aus WEINZIERL et al. (2012a).

modellierte Ascheverteilung zwischen Flight Level (FL) FL000 und FL200 für 06 UTC am 25.05.2011 nach dem Ausbruch des Grimsvötn 2011. Zonen mit niedriger, mäßiger und hoher Vulkanaschekonzentration sind farbcodiert.

Obwohl es mittlerweile die oben genannten Grenzwerte gibt, sind die Limits für gefährliche Aschemassenkonzentrationen nach wie vor höchst unsicher, da wie in Abschnitt 1 beschrieben die Gefährdung eines Flugzeuges durch Vulkanasche von vielen Parametern abhängt. Darüber hinaus können die Ascheeigenschaften von Vulkan zu Vulkan sowie von Eruption zu Eruption variieren womit die Gefährdung verschieden sein kann. WITHAM et al. (2012) haben mit Modellsimulationen gezeigt, dass bei den Vulkanascheeinfügen, in denen Triebwerksausfälle auftraten, Aschemassenkonzentration von mindestens  $4 \text{ mg m}^{-3}$  vorlagen und zum Teil sogar deutlich höhere Werte auftraten. Der Einfluss von Vulkanasche auf Flugzeugtriebwerke soll im Frühjahr 2015 in Bodentests genauer untersucht werden. Bei diesen Tests wird ein Forschungsteam bestehend aus U.S.-Regierungsorganisationen und Triebwerksherstellern ein F117-Triebwerk der NASA über mehrere Stunden Vulkanaschemassenkonzentrationen zwischen 1 und  $10 \text{ mg m}^{-3}$  aussetzen und untersuchen, ab wann Schäden am Triebwerk auftreten. Für die Tests wird natürliche Vulkanasche verwendet, die charakteristisch für Asche in einigen 100 bis 1000 km Abstand zum Vulkan ist (LEKKI et al. 2013).

### 3 Sichtbarkeit von Vulkanasche und die Frage, warum es so schwer ist einen Grenzwert für „Visible Ash“ zu definieren

Eine zusätzliche Forderung neben der Einführung von Vulkanaschegrenzwerten war die Vermeidung von „Visible Ash“, also Ascheregionen, die für das menschliche Auge sichtbar sind. Im nachfolgenden Abschnitt gehen wir der Frage nach, ab welcher Massenkonzentration Vulkanasche in einem Flugzeugcockpit sichtbar ist, ob ein Pilot aus dem Flugzeugcockpit potentiell „gefährlicher“ ( $> 2 \text{ mg m}^{-3}$ ) von „ungefährlicher“ Asche unterscheiden kann und ob man Ascheschichten von anderen in der Atmosphäre vorhandenen Aerosolschichten wie Waldbrandaerosol oder Wüstenstaub unterscheiden kann.

Abbildung 21-1 (rechts) zeigt ein Foto, das während des Vulkanaschemaximums bei geschlossenem Luftraum am 17. April 2010 über München aufgenommen wurde. Auf den ersten Blick ist keine „Aschewolke“ sichtbar. Jedoch ist der Himmel an diesem Tag nicht blau, sondern infolge der Streuung des einfallenden Sonnenlichtes an großen Vulkanaschepartikeln gräulich. Bei der Betrachtung von Abbildung 21-1 (rechts) stellt sich die Frage, ob die Bezeichnung „Aschewolke“ für eine weit von der Quelle entfernte Ascheschicht angemessen ist. Abbildung 21-5 illustriert die Veränderung einer Vulkanascheschicht während des Transportes vom Vulkan in entferntere Gegenden: Es ist offensichtlich, dass die Bezeichnung „Aschewolke“, also die Existenz einer braunen Wolke, nur in der Nähe des Vulkanes zutrifft, wohingegen in größerer Entfernung zum Vulkan eher eine gräulich-bräunliche Schicht, ähnlich der verschmutzten Grenzsichtbar ist. Die Fotos in Abb. 21-5 zeigen nicht nur Ascheschichten, sondern es sind auch die zugehörige mit dem Forschungsflugzeug Falcon in-situ vermessene Aschemassenkonzentration angegeben (Abbildung 21-5 c und d).

Vulkanascheregionen können vom Cockpit eines Flugzeuges aus sichtbar sein, weil sie eine unübliche Farbe haben („braune Aschewolke“) oder weil sie den Kontrast reduzieren (Abbildung 21-5 c und d). Zweiteres ist davon abhängig, wie viel Kontrast vorhanden ist. Nachts und in Gegenwart von Wolken (Abbildung 21-6) ist Vulkanasche nicht (oder nur schlecht) sichtbar. Um der Frage nach der minimal sichtbaren Aschemassenkonzentration nachzugehen haben WEINZIERL et al. (2012 b) die Sichtbarkeit von Ascheschichten aus dem Cockpit eines Flugzeuges mit dem Strahlungstransportmodell „libRadtran“ (MAYER und KYLLING 2005) für eine 500 m dicke Ascheschicht simuliert. Die Sichtbarkeit von Vulkanasche hängt dabei nicht nur vom Hintergrundkontrast und den Beleuchtungsbedingungen (Sonnenstand) ab, sondern auch von der geometrischen Dicke der Ascheschicht, der Größenverteilung der Aschepartikel oder der Position des Beobachters relativ zur Ascheschicht. Die von WEINZIERL et al. (2012b) durchgeführten Simulationen sind deshalb nur ein Hinweis darauf, ab welchen Aschemassenkonzentrationen man Vulkanasche unter idealisierten Bedingungen ohne Wolken untertags sehen würde.

<sup>2</sup> NOTAMs (Notice to Airmen) sind Anordnungen und Informationen über temporäre oder auch permanente Änderungen der Aeronautical Information Publication (AIP), die für einen geordneten, sicheren und flüssigen Flugverkehr wichtig sind.



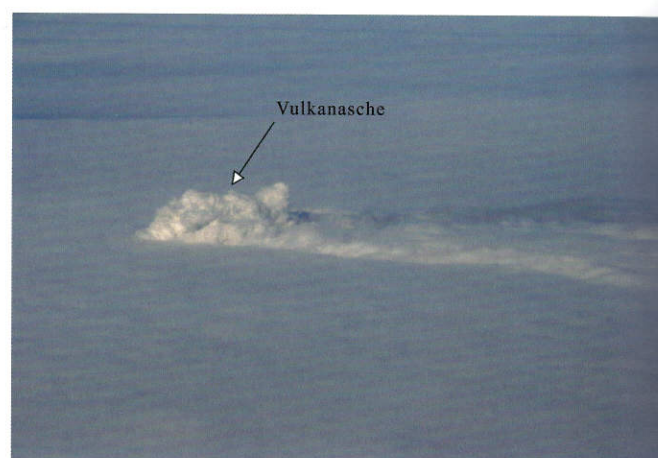
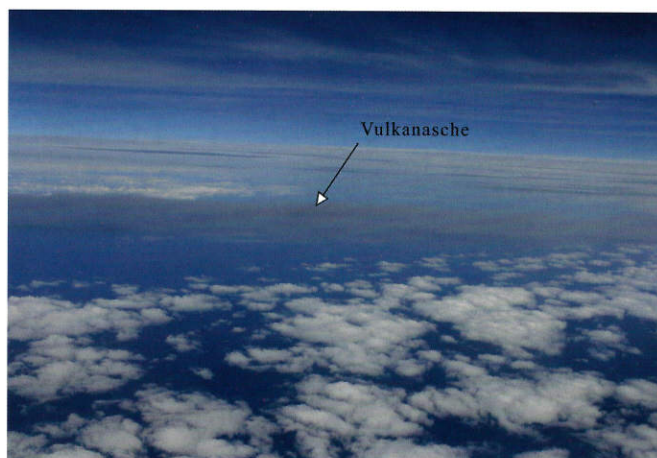


Abb. 21-6: Links: Vulkanasche mit Massenkonzentration  $> 1 \text{ mg m}^{-3}$  und Wolken beobachtet vom DLR-Forschungsflugzeug Falcon am 1. Mai 2010 nahe Island. Rechts: Aschewolke des Eyjafjallajökulls beim Überflug über den Vulkan am 29. April 2010.

Die Ergebnisse der idealisierten Simulationen zeigen, dass Ascheschichten unter optimalen Bedingungen (niedrige Hintergrundaerosolkonzentration, keine Wolken) schon ab Konzentrationen deutlich unter dem in Deutschland gültigen „Grenzwert für sicheres Fliegen“ ( $2 \text{ mg m}^{-3}$ ) für das menschliche Auge sichtbar sein können. Der Parameter der die Sichtbarkeit maßgeblich mitbestimmt ist dabei die geometrische Dicke der Ascheschicht und die optische Dicke entlang der Sichtlinie des Beobachters. Abbildung 21-7 zeigt den Einfluss der vertikalen Mächtigkeit der Ascheschicht auf die Sichtbarkeit: von links nach rechts nimmt die geometrische Dicke der Ascheschicht von 500 m auf 2 km zu. Gleichzeitig nimmt die Aschemassenkonzentration in der simulierten Schicht von  $2 \text{ mg m}^{-3}$  auf  $0,5 \text{ mg m}^{-3}$  ab. In allen drei Fällen erscheint die Ascheschicht für das menschliche Auge gleich, obwohl im Fall der 2 km dicken Ascheschicht (Abbildung 21-6, rechts) die Massenkonzentration um einen Faktor 4 niedriger ist als im Fall der 0,5 km mächtigen Ascheschicht (Abbildung 21-7, links). Aus Abb. 21-7 ist erkennbar, dass die geometrische Dicke einer Ascheschicht die Sichtbarkeit von Ascheregionen stark beeinflusst. Im Gegensatz dazu hängt der Einfluss von Vulkanasche auf Flugzeugtriebwerke von der Aschemassenkonzentration beziehungsweise der Aschedosis ab und nicht von der vertikalen Mächtigkeit der Ascheschicht. Vulkanasche kann zwar als graue Schicht erkennbar sein, jedoch weist das Vorhandensein einer grauen Schicht nicht zwingend auf die Präsenz von Vulkanasche in der Atmosphäre hin. So ist auch Saharastaub, Waldbrandaerosol oder die verschmutzte Grenzschicht als graue Schicht in der Atmosphäre erkennbar (siehe Abbildung 21-8).

Die Simulationen von WEINZIERL et al. (2012a) und SAUER et al. (2013) sowie die Fotos in den Abbildungen 21-5, 21-6 und 21-8 zeigen, dass es weder einen eindeutigen Grenzwert für die Sichtbarkeit von Vulkanasche für das menschliche Auge gibt, noch können Vulkanascheschichten visuell von anderen Aerosolschichten wie zum Beispiel Saharastaub oder Waldbrandaerosol unterschieden werden. „Visible Ash“ kann damit kein gutes Sicherheitskriterium sein. Die in diesem Abschnitt beschriebenen Arbeiten sind mittlerweile in ein Working Paper der ICAO „International Airways Volcano Watch Operations Group“ eingegangen, in dem „Visible Ash“ definiert wird:

“Visible Ash be defined as “volcanic ash observed by the human eye” and not be defined quantitatively by the observer; (...) In particular, “visible” should absolutely not be considered as a proxy for the widely referenced concentration value of  $2 \text{ mg m}^{-3}$ .”

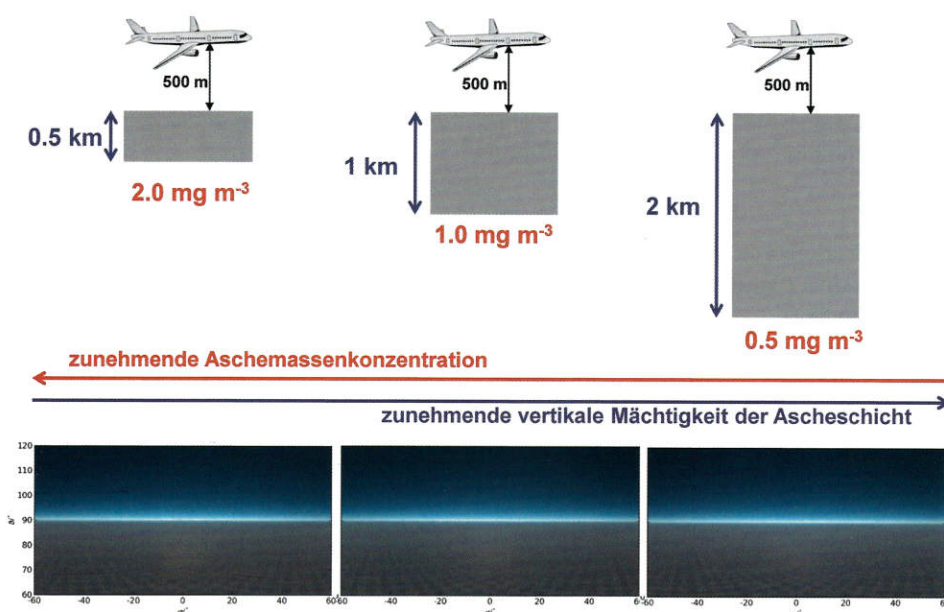


Abb. 21-7: Einfluss der geometrischen Dicke der Ascheschicht auf die Sichtbarkeit: Von links nach rechts nimmt die geometrische Dicke der Ascheschicht zu und die Massenkonzentration in der Ascheschicht ab. In allen drei Fällen erscheint die Ascheschicht für das menschliche Auge gleich (Simulationsergebnisse: Daniel Sauer, LMU/DLR).





Abb. 21-8: Links: Blick vom Forschungsflugzeug Falcon auf eine 5 km mächtige Saharastaubschicht in der Kapverden-Region am 11. Juni 2013. Die Saharastaubschicht reduziert den Kontrast so stark, dass der Boden nicht mehr erkennbar ist. Rechts: 2 km mächtige Waldbrandaerosolschicht fotografiert am 11. Juni 2012 in der Nähe von Salina, Kansas (USA).

Für den operationellen Einsatz und zur Erstellung von Vulkanaschewarnungen durch die Vulkanaschewarnzentren (VAAC) wird deswegen in Zukunft „Discernible Ash“, die durch vereinbarte In-Situ- und/oder Fernerkundungsverfahren bestimmte Aschekonzentration, als Kriterium benutzt.

#### 4 Retrospektiver Blick auf den Ausbruch des Eyjafjallajökull 2010

Der Ausbruch des Eyjafjallajökull im Frühjahr 2010 hatte einen großen Einfluss auf den Luftverkehr in Europa. Die Stärke dieses Ausbruches war jedoch auf der Intensitätsskala von Vulkanausbrüchen nur ein „mittlerer“ Ausbruch mit einer Rekurrenzzeit von 30 bis 50 Jahren. Im Unterschied zu vielen anderen, zum Teil nur wenige Stunden andauernden Vulkanausbrüchen, hatte der Eyjafjalla-Ausbruch über einen Zeitraum von 39 Tagen zwei explosive Phasen, die durch eine Phase von Lavabildung und reduzierter Aktivität getrennt waren (PETERSEN et al. 2012). Durch die vorherrschenden meteorologischen Bedingungen wurde die Vulkanasche schnell südwärts nach Zentraleuropa transportiert (zum Beispiel STOHL et al. 2011). Die Windverhältnisse auf 500 hPa zeigten dabei im Frühjahr 2010 mit einer deutlich erhöhten nördlichen Windkomponente eine klare Abweichung vom klimatologischen Mittelwert (PETERSEN et al. 2012). Mittlere Windrichtungen in bestimmten Höhen sind zwar ein Maß für den Vulkanaschetransport, sie berücksichtigen aber weder die Emissionshöhe, noch die Menge der emittierten Asche oder komplexe meteorologische Situationen. WEINZIERL et al. (2012a) haben deswegen mit dem Lagrangeschen Transportmodell FLEXPART (STOHL et al. 2005) den potentiellen Aschetransport auf statistischer Basis untersucht. Um abzuschätzen, ob der Transport der Eyjafjallajökull-Vulkanasche nach Zentraleuropa einer meteorologischen Ausnahmesituation im Frühjahr 2010 geschuldet war oder ob es sich hier um ein typisches Transportmuster handelt, wurde mit FLEXPART berechnet, wie oft bei einem Ausbruch des Eyjafjallajökull an einem beliebigen Tag im Zeitraum zwischen 1999 und

2010 eine Massenkonzentration von  $2 \text{ mg m}^{-3}$  an einem beliebigen Punkt in Deutschland überschritten worden wäre. Die Ergebnisse der idealisierten Simulationen zeigen eine durchschnittliche Überschreitung des Grenzwertes von  $2 \text{ mg m}^{-3}$  von 32 Stunden mit einem Maximum von 81 Stunden für einen Ausbruch am 18. September 2001 und einem Minimum von 3,8 Stunden für einen Ausbruch am 2. Januar 2001. Damit war der Transport von Eyjafjalla-Vulkanasche nach Zentraleuropa kein außergewöhnliches Ereignis, wenn man die ungewöhnlich lange Dauer der Eruption berücksichtigt. Auch auf geologischen Zeitskalen ist der Transport von isländischer Vulkanasche nach Nord- und Zentraleuropa nicht ungewöhnlich: SWINDLES et al. (2011) zeigen auf der Basis von Sedimentanalysen für die vergangenen 7000 Jahre, dass die Wahrscheinlichkeit eines Tephra-Fallouts über Nordeuropa in einer Dekade bei 16 % liegt. Es ist deswegen notwendig, für den Fall eines erneuten Vulkanausbruches in Island mit nachfolgendem Aschetransport nach Deutschland vorbereitet zu sein.

#### 5 Vorgehensweise zur Herausgabe von Vulkanaschewarnungen und -warnungen im Deutschen Wetterdienst (Stand: 20.06.2013)

Aufgrund der Erfahrungen mit den Vulkanausbrüchen 2010 und 2011 auf Island war die Entwicklung eines Betriebskonzeptes notwendig, das die Aktivitäten des DWD und die Zusammenarbeit mit der Deutschen Flugsicherung (DFS) und Krisenstäben des Bundes und der Länder regelt. Im folgenden Kapitel beschreiben wir die Vorgehensweise des DWD bei einem Vulkanausbruch mit nachfolgender Verlagerung einer Vulkanaschewolke nach Mitteleuropa in den deutschen Luftraum. Die größte Herausforderung nach einem Vulkanausbruch ist dabei die räumliche und zeitliche Vorhersage von Vulkanaschemassenkonzentrationen und deren Verbreitung an operationelle Entscheidungsträger bei der DFS.

Zur Vermeidung der Gefahren von Vulkanausbrüchen für die Luftfahrt werden von der ICAO seit geraumer Zeit Handbücher und Notfallpläne herausgegeben. So beschreibt



als Beispiel das "ICAO – Handbook on the International Airways Volcano Watch (IAVW)-Operational Procedures and Contact List" die notwendigen Abläufe im Falle eines Vulkanausbruchs zur Unterrichtung der Luftfahrt. Nach den Erfahrungen mit den isländischen Vulkanausbrüchen 2010 und 2011 wurden die ICAO-Regelungen überarbeitet, Zuständigkeiten wurden neu geregelt, die Formate für Vulkanaschehinweise (*Volcanic Ash Advisories*), SIGMETs VA<sup>3</sup>, NOTAMs und ASHTAM<sup>4</sup>s wurden verbessert und es wurden regelmäßige Übungen eingeführt.

Grundlagen zur Verbreitung von Warnungen vor Vulkanasche sind neben ICAO Annex 3 (*Meteorological Service for International Air Navigation*) der ICAO EUR Doc 019 (*ICAO European Volcanic Ash Contingency Plan*). Laut ICAO Annex 3 sind die *Meteorological Watch Offices* (MWO) für die Herausgabe von SIGMETs zuständig, die auf signifikante Wettererscheinungen für die Luftfahrt hinweisen. MWOs in Deutschland sind die DWD-Luftfahrtberatungszentralen an den Flughäfen Frankfurt/Main, Hamburg und München.

In der Vergangenheit war der DWD ausschließlich von den Vorhersagen und Hinweisen des VAAC in London abhängig. Ein dem Warnprozess konformes Vorgehen war nicht möglich, da eigene Modellvorhersagen nicht zur Verfügung standen, sowie ein Beobachtungsnetz und besondere Beobachtungsmethoden weitgehend fehlten oder nicht operationell nutzbar waren. Das Betriebskonzept Vulkanaschevorhersage im DWD beschreibt, übertragen auf die besonderen Anforderungen zur Überwachung, Beobachtung und Vorhersage von Vulkanasche, die im flugmeteorologischen Warnprozess des DWD übliche Vorgehensweise, ein Nowcasting mit Beobachtungen und Messungen aus der Fernerkundung sowie bodengestützter Daten und eine Vorhersage auf Basis geeigneter Vorhersagemodelle durchzuführen.

Im Falle eines Vulkanausbruchs werden VA-Teams bestehend aus zwei Flugwetterberatern gebildet, die nach einem 24-stündigen Einsatzplan organisiert sind und denen die folgenden Tätigkeiten obliegen:

- Bewertung der kurzfristigen VA-Vorhersagen vom VAAC London, VAAC Toulouse, sowie weiterer Vorhersagemodelle wie COSMO\_ART (DWD) oder FLEXPART vom *Norwegian Institute for Air Research* (NILU). Abbildung 21-9 zeigt ein Beispiel für Vulkanaschevorhersagen mit COSMO\_ART,
- Bewertung mittelfristiger Szenarien mittels aller verfügbaren Vorhersagemodelle zur Windströmung und Ausbreitung der Vulkanasche,
- Auswertung aller verfügbaren Beobachtungen und Messungen (Satellitendaten, Online-Ceilometer, LIDAR, flugzeuggestützte Messungen). Abbildung 21-10 gibt einen Überblick über die zur Verfügung stehenden Ceilometermessungen,
- Erstellung von Vorwarnungen,

- Erstellung von NOTAM-Vorlagen zur internationalen Verbreitung (Vorhersage für 6 Stunden, Aktualisierung alle 6 Stunden, gegebenenfalls zwischenzeitlich Amendierungen bei Vorliegen neuer Erkenntnisse),
- Erstellung stündlich aufgelöster Vorhersagen für den Luftraum der Bundesrepublik Deutschland für mäßige und hohe Konzentrationen (Vorhersage für 12 Stunden, Aktualisierung alle 6 Stunden, gegebenenfalls zwischenzeitlich Amendierungen bei Vorliegen neuer Erkenntnisse),
- Direkte Beratung der Entscheidungsträger von DFS und BMVI (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur),
- Information der Luftfahrtberatungszentralen (LBZ) mittels regelmäßiger und situativer Telefonkonferenzen,
- Erstellung eines Statusberichtes alle 6 Stunden für den DWD (Vorstand, Abteilung Flugmeteorologie, Stabstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit, Online-Redaktion) sowie die DFS und Krisenstäbe.

## 5.1 Phasen des Vulkanausbruchs und damit verbundenes Vorgehen

Bei einem Vulkanausbruch unterscheidet man drei Phasen (Alarmphase, reaktive Phase und aktive Phase), die ein unterschiedliches Vorgehen verlangen. Tabelle 21-2 gibt einen Überblick über die Aktivitäten in Deutschland in den unterschiedlichen Phasen eines Vulkanausbruchs in Europa und angrenzenden Gebieten. Die aus den ICAO Dokumenten entnommenen Betriebsphasen werden in Deutschland mit besonderen Maßnahmen konkretisiert, die speziell zwischen DWD und DFS in *Service Level Agreements* festgelegt wurden, um bestmögliche operative Ergebnisse zu erzielen.

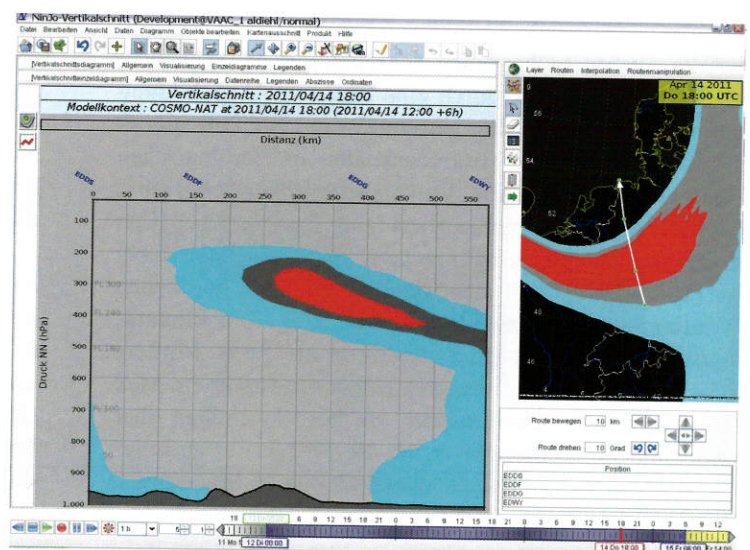


Abb. 21-9: Vulkanaschevorhersagen mit COSMO\_ART im meteorologischen Vorhersagesystem NinJo. Die Simulationen entstanden bei einer Vulkanascheübung und zeigen eine Vulkanascheschicht, die am 14.04.2011 um 18 UTC über West- und Zentraleuropa liegt (rechts). Auf der linken Seite ist ein Vertikalschnitt entlang des weißen Pfeils in der rechten Abbildung dargestellt. Farbcodiert sind niedrige ( $0,2-2 \text{ mg m}^{-3}$ , türkis), mäßige ( $2-4 \text{ mg m}^{-3}$ , grau) und hohe ( $> 4 \text{ mg m}^{-3}$ , rot) Aschemassenkonzentrationen (Quelle: NinJo/COSMO\_ART DWD intern).

<sup>3</sup> VA (*Volcanic Ash*): Vulkanasche

<sup>4</sup> Ein ASHTAM (*ash report to airman*) ist eine Spezialform des NOTAMs, das vor vulkanischen Aktivitäten, Vulkanausbrüchen und vulkanischen Aschewolken warnt, sofern sie für die Luftfahrt von Bedeutung sind.



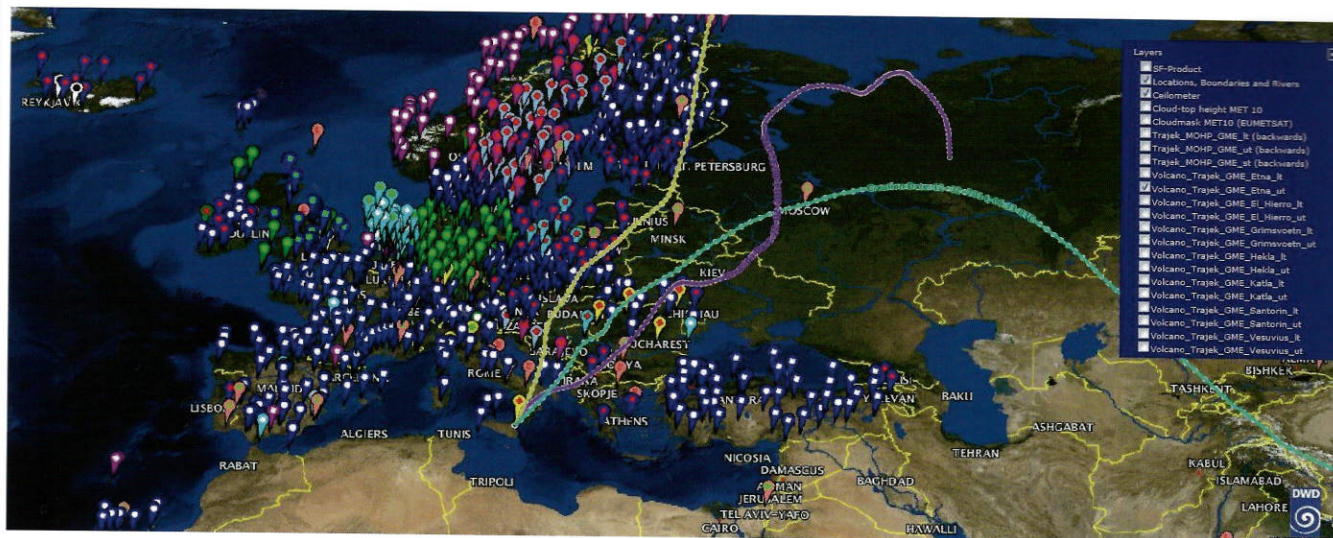


Abb. 21-10: Landkarte mit verfügbaren Ceilometermessungen zusammen mit möglichen Trajektorien für Luftmassen, die von einem Vulkanausbruch des Ätna in unterschiedlichen Höhen ausgehen würden (Quelle: <http://www.dwd.de/ceilomap>).

Die Alarmphase bezeichnet eine Situation, in der ein Vulkanausbruch erwartet wird. Wird einer MWO-Stelle bekannt, dass ein Vulkanausbruch zu erwarten ist, werden die Informationen über das Ausmaß der Vulkanaktivitäten unmittelbar an die zugehörigen ACC (*Area Control Center* – Flugsicherung) und das zuständige VAAC weitergegeben. Dadurch entwickelt sich ein internationaler Datenaustausch. Die Abteilung Flugmeteorologie hat diverse Maßnahmen ergriffen (zum Beispiel durch die Zumeldung von E-Mail-Verteilern und Notfalllisten), um rechtzeitig von Vulkanaktivitäten vor der Herausgabe von *Volcanic Ash Advisories* (VAAs) informiert zu werden (siehe Tabelle 21-2).

Die reaktive Phase beschreibt eine Situation, bei der ein Vulkanausbruch erfolgt ist und sich Vulkanasche im Luftraum über dem ausgebrochenen Vulkan befindet, oder bereits benachbarte Gebiete erreicht hat. Es ist dabei auf Basis der vorliegenden Informationen noch nicht zu erwarten, dass der deutsche Luftraum in den nächsten 12 Stunden betroffen sein wird. Infolge des Vulkanausbruches informiert das für diesen Luftraum zuständige MWO unverzüglich das verantwortliche VAAC durch die Ausgabe einer SIGMET Information über den Vulkanausbruch oder die beobachtete Vulkanaschewolke im betroffenen Luftraum.

Außerdem werden alle relevanten Informationen über das Ausmaß und die Konzentration von vulkanischer Asche an die angrenzenden MWOs weitergegeben. Wird einem MWO das Auftreten von vulkanischer Asche aus einer anderen Quelle als dem VAAC bekannt, werden diese Informationen umgehend dem VAAC und den benachbarten MWOs bekannt gemacht, in die sich die Aschewolke verlagern könnte.

Nach Bekanntwerden des Vulkanausbruches wird ein besonderes Vulkanaschewolken-„Monitoring“ mittels Satellitendaten, Fernerkundung, Observatorien und numerischer Wettervorhersage initiiert. Im Einzelfall werden

auch *Special Air Reports* über Vulkanaktivitäten (zum Beispiel Rauchfahnen) vor dem eigentlichen Ausbruch an das zuständige VAAC übertragen. Die vom VAAC herausgegebenen VAAs enthalten Hinweise auf potentiell mit Vulkanasche kontaminierte Gebiete (in Form von Koordinaten) und Höhenintervalle (in Flugflächen). Damit geben die VAAs zwar die maximale räumliche Ausdehnung der Aschewolke wieder, enthalten aber keine Konzentrationsangaben. Gemäß internationalen Vorschriften sollen diese „Hinweise“ von den MWO-Stellen weiterverarbeitet werden. Darüber hinaus werden Daten und Karten für unterschiedliche Aschekonzentrationen herausgegeben, um zwischen niedrig kontaminierten und hoch kontaminierten Gebieten besser differenzieren zu können. Wenn Unterschiede zwischen Beobachtungen von Flugzeugen und Informationen in veröffentlichten VAAs, SIGMETs oder NOTAMs festzustellen sind, wird vom VAAC unverzüglich ein korrigierter Bericht, vorzugsweise in Form eines ARS (*Air Report Special*) und/oder eines korrigierten VAA für die jeweiligen MWOs erstellt. Das zuständige MWO erstellt danach auf Basis des korrigierten Advisories ein neues SIGMET.

Nach der Kenntnisnahme über die Existenz einer „Vulkanaschewolke“ in der näheren Umgebung und einer möglichen Verlagerung in den deutschen Luftraum in einem Zeitraum von mehr als 12 Stunden werden im DWD die in Tabelle 21-2 aufgeführten Aktivitäten eingeleitet. Solange zu erwarten ist, dass der deutsche Luftraum in den nächsten 12 Stunden noch nicht von der Vulkanaschewolke betroffen ist, müssen nach Erhalt eines VAAs, eines Special Air Report oder Informationen aus anderen Quellen über Vulkanasche alle verfügbaren Daten ständig miteinander verglichen und auf Konsistenz geprüft werden.

In der aktiven Phase wird erwartet, dass die Vulkanaschewolke in den nächsten 12 Stunden im deutschen Luftraum ankommt. Tabelle 21-2 fasst die von der „Task Force Vulkanaschevorhersage“ in dieser Phase durchgeführten Aktivitäten zusammen.



Phase	Handlungsschritte
Alarmphase (Vorbereitung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktivierung von Notfallplänen und Versand von Verteilerlisten an BMVI, BAF (<b>Bundesaufsicht</b>-samt für Flugsicherung), DFS und DLR,</li> <li>• Einstellung erster Informationen über mögliche Vulkanaktivitäten über die Emergency Website (geschlossene Benutzergruppe im <i>Meteorological Airport Briefing</i> des DWD),</li> <li>• Überprüfung der DWD-Produkte mit potentiellen Informationen über Vulkanasche auf Aktualität (<i>Low Level Significant Weather Chart</i> - LLSWC, METAR, GAMET, SIGMET, graphische Darstellungen von Modellvorhersagen und VAA),</li> <li>• Information der Nutzer der Emergency Website über mögliche Vulkanaktivitäten,</li> <li>• Information der MWOs des DWD durch die Abteilung Flugmeteorologie über mögliche Aktivitäten,</li> <li>• Information der Geschäftsbereiche des DWD und Einleitung von Aktivitäten, um Online-Ceilometer- und Flugzeugmessungen verfügbar zu haben und die Modellkette für Ausbreitungsberechnungen zu starten,</li> <li>• Information von DFS und BMVI über einen möglichen Vulkanausbruch.</li> </ul>
Reaktive Phase (Überwachung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktivierung der „Task Force Vulkanaschevorhersage“ im „Rund-um-die-Uhr-Betrieb“ zur Steuerung und Überwachung aller nachfolgenden Aktivitäten,</li> <li>• Prüfung von Formularen und Unterlagen für die Herausgabe von SIGMETs (VA) und Flughafenwetterwarnungen,</li> <li>• Überwachung aller verfügbaren Datenquellen und Prüfung von Formularen und Unterlagen zur Herausgabe von NOTAMs,</li> <li>• Verbreitung aller VAA-Hinweise und eigener Einschätzungen über die weitere Entwicklung über die <i>Emergency Website</i>,</li> <li>• Durchführung von weiteren über das Maß der Alarmphase hinausgehende Aktivitäten.</li> </ul>
Aktive Phase (Warnung)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Herausgabe von SIGMETs (VA), ggf. Herausgabe von Flughafenwetterwarnungen, Prüfungen zur Herausgabe von NOTAMs,</li> <li>• Überwachung aller verfügbaren Datenquellen, Vergleich von Modelldaten und Beobachtungsdaten,</li> <li>• Bereitstellung aller VAA-Hinweise und eigener Einschätzungen über die weitere Entwicklung auf der <i>Emergency Website</i>,</li> <li>• Überprüfung aller Produkte des DWD, welche potentiell Informationen über Vulkanasche enthalten können (SIGMET, NOTAM, ASHTAM, SWC, METAR; GAMET, graphische Darstellungen von Modellvorhersagen und VAA) auf kontinuierliche Aktualisierung auf der Emergency Website,</li> <li>• Kontinuierliche Erinnerung und Information der Nutzer der Emergency Website über die Existenz der Vulkanaschewolke und die Verlagerung in den deutschen Luftraum,</li> <li>• Information der eigenen Luftfahrtberatungszentralen über Aktivitäten, die über die Informationen aus <i>Advisories</i> und <i>Special Air Reports</i> hinausgehen und Abstimmung des weiteren Vorgehens unter anderem in regelmäßigen Telefonkonferenzen,</li> <li>• Information der Geschäftsbereiche des DWD über laufenden Aktivitäten und Abstimmung über das weitere Vorgehen,</li> <li>• Beratung der eingesetzten Flugzeugbesatzung und Empfehlungen für durchzuführende Messflüge; Übermittlung der Messergebnisse an den operationellen Flugwetterdienst.</li> </ul>

Tabelle 21-2: Phasen eines Vulkanausbruches und damit verbundenes Vorgehen im DWD.

## 5.2 Vulkanaschevorhersageprodukte zur operationellen Steuerung

Die Vorhersageprodukte des DWD auf Basis aller verfügbaren Informationen müssen zunächst die ICAO-Standards in Form von VA-SIGMETs- und VA-NOTAM-Vorlagen bedienen. Für die operationelle Steuerung der Flugsicherung soll ein eigens entwickeltes Format genutzt werden, die VA-Konzentrationsvorhersagen.

Während das VA-SIGMET keine Konzentrationsvorhersage ist und sich nach dem Format von ICAO Annex 3 richtet, ist die VA-NOTAM-Vorlage nach den gültigen Vorschriften des ICAO EUR Doc 019 (*Volcanic Ash Contingency Plan*) zu erstellen. Hier werden mäßige und hohe Konzentrationen für unterschiedliche Höhen, für einen

festen Zeitpunkt (+6 Stunden) und für unterschiedliche Lufträume angegeben.

Die VA-Konzentrationsvorhersagen sind eine Eigenentwicklung für den gesamten deutschen Luftraum. Die Deutsche Flugsicherung benötigt im Krisenfall eine stündlich aufgelöste Vorhersage für die gesamte Bundesrepublik, also einen (oder mehrere) Polygonzüge für das Gesamtgebiet oder mit Unterteilung in Lufträume. Mit der Visualisierung in NinJo sind Konzentrationsangaben aus unterschiedlichen Quellen verfügbar. Der verantwortliche Meteorologe soll neben der Konzentrationsvorhersage des VAAC London weitere Informationen aus Sekundärquellen (Modelle und Beobachtungen) verwenden, um letztendlich in einer Zusammenschau Entscheidungen über mögliche Konzentrationen im Luftraum der



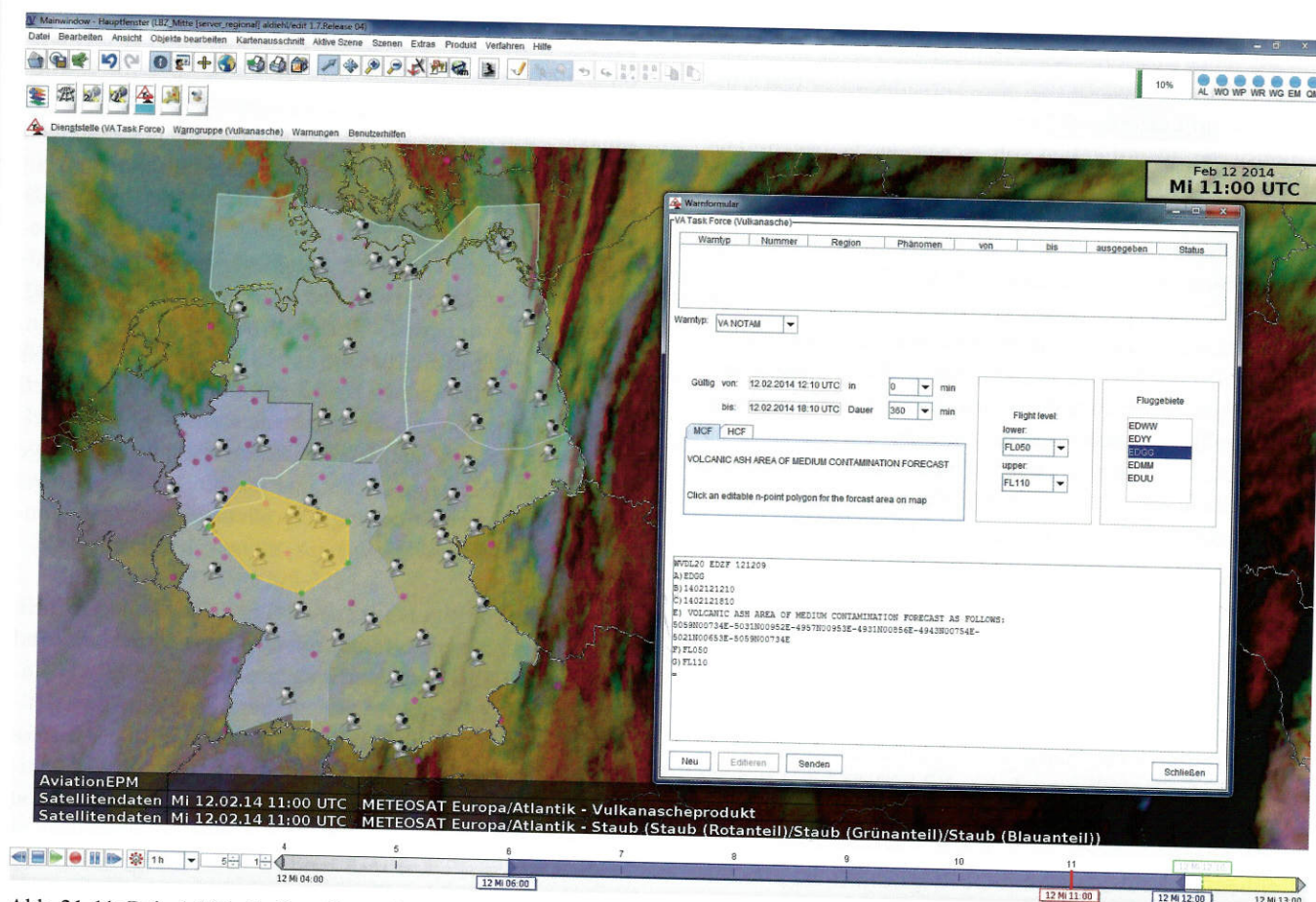


Abb. 21-11: Beispiel für die Erstellung einer NOTAM-Vorlage für die DFS (Text auf der linken Seite des Bildes) aus dem NinJo-System. Mit dem Editionslayer „AviationEPM“ werden die in der Karte eingeklickten Polygonpunkte direkt in das Editionssystem übertragen. Daraus ergibt sich das internationale NOTAM Format in Bulletinformat, das anschließend die DFS in ihren Systemen weiterverarbeitet. In NinJo können zur Analyse der Situation in unterschiedlichen Layern Satellitenkanäle und -produkte, Ceilometerstandorte und viele weitere Produkte zur Analyse übereinander gelegt werden.

Bundesrepublik Deutschland zu treffen. Mittels des NinJo-VA-Editors können Polygonzüge erzeugt werden, die automatisch in die jeweiligen Bulletins integriert werden. Ein Auswahlfenster ermöglicht die Wahl verschiedener Datenquellen und/oder der Darstellung aller verfügbaren Koordinaten, so dass der Polygonzug grafisch erzeugt werden kann (siehe Abbildung 21-11). Wenn aktuelle VAAs von VAAC London oder Toulouse vorliegen, und in den VAAs Vulkanasche im deutschen Luftraum vorhersagt wird, müssen zunächst SIGMETs VA gemäß den Vorgaben von den MWOs herausgegeben werden. Die „Task Force Vulkanaschevorhersage“ nimmt die SIGMETs zur Kenntnis und prüft daraufhin alle vorhandenen Datenquellen auf Informationen über vorhandene Vulkanasche und die weitere mögliche Entwicklung.

Gibt es mehrere Hinweise darauf, dass die Vulkanaschekonzentrationen bestimmte „Grenzwerte“ erreichen oder überschreiten (siehe auch Tabelle 21-1), ist zu entscheiden, ob für den deutschen Luftraum Konzentrationsvorhersagen herausgegeben werden. Die Entscheidung fällt nach Rücksprache zwischen den im Dienst befindlichen Mitarbeitern der „Task Force Vulkanaschevorhersage“ und der Abteilungsleitung Flugmeteorologie und kann je nach Erkenntnislage von den Vorhersagen der VAAC abweichen. Die Vorgehenswei-

se zur Verwendung und Interpolation der Koordinaten zu Zwischenterminen wird in der „Task Force Vulkanaschevorhersage“ geregelt.

Als Entscheidungsgrundlagen stehen voraussichtlich beim nächsten Vulkanausbruch folgende Daten zur Verfügung:

- Dateien und Karten der *Volcanic Ash Advisory Center* London und Toulouse,
- COSMO\_ART-Modelldaten in NinJo,
- Satellitenprodukte (überwiegend Meteosat 9) in NinJo,
- Online-Ceilometer und LIDAR-Daten über NinJo oder Internet-Quellen,
- aktuelle Messungen per Flugzeug.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick auf zukünftige Herausforderungen („Research Needs“)

Der Ausbruch des isländischen Vulkanes Eyjafjallajökull im Frühjahr 2010 führte zu weitreichenden Luftraumsperrungen über Europa und dem Nordatlantik. Diese Luftraumsperrungen waren die logische Konsequenz aus den Vulkanaschezwischenfällen mit Flugzeugen in den 1980er Jahren und der daraufhin von der Internationale Zivilluftfahrtorganisation ICAO empfohlenen „Null-Toleranz-Regel“ hinsichtlich des Fliegens in Vulkanasche. Der Ausbruch des Eyjafjallajökull hat gezeigt, dass die Luftfahrtbetreiber



offensichtlich unvorbereitet waren auf die Folgen eines solchen Vulkanausbruches und das Vorhandensein von Vulkanasche im Luftraum (Messnetz, Grenzwerte, Kommunikationswege, Identifikation von aschefreien Gebieten). Die von zahlreichen Forschungseinrichtungen 2010 aus wissenschaftlichem Interesse durchgeführten Flugzeug- und Bodenmessungen haben wichtige Daten zur Charakterisierung der Situation und zur Modellüberprüfung geliefert.

Nach den Erfahrungen mit den explosiven Vulkanausbrüchen 2010 und 2011 in Island wurden ICAO-Regelungen überarbeitet, Zuständigkeiten neu geregelt und die Möglichkeiten der Detektion und Vorhersage von Vulkanasche verbessert. Um Störungen des Luftverkehrs zu minimieren, wurden Ende April 2010 vorläufige Vulkanaschegrenzwerte für „sicheres Fliegen“ ( $2 \text{ mg m}^{-3}$ ) eingeführt, die nach dem Ausbruch des Grimsvötn 2011 in Deutschland etabliert wurden.

Obwohl der Ausbruch des Eyjafjalla Vulkanes mit 39 Tagen außerordentlich lang dauerte (länger als jeder andere isländische Vulkanausbruch in den vergangenen 30 Jahren), ist der Transport von Asche von einem Vulkanausbruch in Island nach Zentraleuropa kein ungewöhnliches Ereignis. Zukünftige Vulkanausbrüche in Island können durchaus wieder zum Transport von Vulkanasche nach Zentraleuropa führen und es besteht auch die Möglichkeit, dass Aschewolken mit deutlich höheren Massenkonzentrationen auch für längere Zeiten im Luftraum von Deutschland auftreten. Rückblickend zeigt sich, dass der neue Grenzwert für Vulkanasche während des Ausbruchs des Eyjafjallajökull nur zeitweise im westlichen Teil von Deutschland überschritten war und im südlichen Teil von Deutschland im April/Mai 2010 höchstwahrscheinlich nie überschritten wurde.

Als zusätzliches Sicherheitskriterium zu Vulkanaschegrenzwerten wurde von der ICAO empfohlen „Visible Ash“, also Ascheregionen, die vom menschlichen Auge gesehen werden können, zu vermeiden. Die Sichtbarkeit von Vulkanasche ist jedoch von vielen Parametern abhängig wie zum Beispiel der geometrischen Dicke der Ascheschicht, dem Sonnenstand, den mikrophysikalischen und optischen Vulkaneigenschaften oder dem Winkel, unter dem der Beobachter auf die Ascheschicht blickt. Zudem ändert sich die Erscheinung von Vulkanasche drastisch mit zunehmender Entfernung vom Vulkan von einer braunen „Aschewolke“ zu einer grauen Ascheschicht, ähnlich der verschmutzten Grenzschicht, Saharastaub oder Waldbrandaerosol in der Atmosphäre. Mit dem menschlichen Auge können Vulkanascheschichten unter guten Beobachtungsbedingungen (keine Wolken, niedrige Hintergrund-Aerosolkonzentration) schon ab Massenkonzentrationen von  $0,2$  bis  $0,5 \text{ mg m}^{-3}$  sichtbar sein. Jedoch kann das Vorhandensein von Wolken dazu führen, dass Vulkanascheschichten mit Massenkonzentrationen deutlich über dem Grenzwert nicht sichtbar sind. Es ist nicht möglich, visuell zu entscheiden, ob eine Vulkanascheschicht potentiell gefährlich (Aschemassenkonzentrationen  $> 2 \text{ mg m}^{-3}$ ) ist oder nicht. Somit ist „Visible Ash“ nicht quantitativ.

Infolge einer spezifischeren Regulierung und der Definition von Aschegrenzwerten, wird die Vorhersage von Aschegebieten in Zukunft eine größere Herausforderung. War es im Jahr 2010 nur notwendig, die Position der Ascheschicht vorherzusagen, muss mit der neueren Regulierung nicht nur der Ort der Ascheschicht, sondern auch die Aschemassenkonzentration korrekt vorhergesagt werden. Die Aschemassenkonzentration hängt dabei stark von der Emissionsstärke des Vulkanes ab, die nicht nur von Tag zu Tag, sondern sogar innerhalb weniger Minuten variieren kann. Ein weiteres Problem für eine korrekte Vorhersage ist, dass die trockene und feuchte Deposition der Asche im Modell und damit die Auswaschmechanismen gut von den Modellen repräsentiert werden müssen. Jedoch ist die Vorhersage von Niederschlag in globalen und lokalen Modellen bisher eine große Herausforderung (vor allem, wenn es um konvektiven Niederschlag geht).

Um auf zukünftige Vulkanausbrüche vorbereitet zu sein und um einen sicheren Luftverkehr zu gewährleisten, sind verlässliche Tools zur Vorhersage und Detektion von Regionen mit Aschemassenkonzentrationen, die über definierte Grenzwerte hinausgehen, notwendig. Eine effektive Regulierung erfordert nicht nur die Definition von kritischen Aschemassenkonzentrationen, sondern auch von kritischen Aschedosen. Die Aschegrenzwerte müssen in Labortests verifiziert und ggf. an neue Erkenntnisse aus diesen Tests angepasst werden. Ein effizienter Luftverkehr braucht darüber hinaus verlässliche Tools zur Identifikation von „aschefreien“ Gebieten. Die Installation und der Test von Lidarnetzwerken, wie er vom MetOffice und vom DWD betrieben wird, die Entwicklung von satellitengestützten Algorithmen zur Detektion von Vulkanasche und flugzeuggetragene Messungen spielen dabei eine wichtige Rolle. Um zukünftig überflüssige Luftraumsperrungen zu vermeiden, müssen diese prognostischen und diagnostischen Tools zertifiziert und in die Entscheidungsprozesse implementiert werden.

Es müssen neue Instrumente zu einer besseren Vermessung von Vulkanasche getestet werden, und es sind Forschungsanstrengungen zur besseren In-Situ-Detektion der Aschemassenkonzentration notwendig. Es muss dabei sichergestellt werden, dass diese neuen Detektoren in der Lage sind, Vulkanasche von anderen Aerosolen wie Saharastaub oder Wasser- und Eiswolken zu unterscheiden. Außerdem muss sichergestellt werden, dass flugzeuggetragene Messungen in der Lage sind, große ( $> 1 \mu\text{m}$ ) Vulkanaschepartikel zu detektieren, die die vorhandene Aschemassenkonzentration dominieren.

## Literatur

ANSMANN, A., TESCHE, M., et al., 2010: The 16 April 2010 major volcanic ash plume over central Europe: EARLINET lidar and AERONET photometer observations at Leipzig and Munich, Germany. *Geophys. Res. Lett.* **37**, L13810.



- BMVBS, 2011: Bekanntmachung der Allgemeinverfügung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung über Regelungen für die Durchführung von Flügen in mit Vulkanaerosol (Vulkanasche) kontaminierten Lufträumen. LR 23/6163.10/3. *BMVBS*, 5 Seiten.
- CASADEVALL, T. J., 1993: Volcanic hazards and aviation safety: Lessons of the past decade. *Flight Safety Foundation, Flight Safety Digest*, 1-9.
- DINGWELL, D. B., 1996: Volcanic dilemma: Flow or blow? *Science* **273**, 1054-1055.
- FLENTJE, H., CLAUDE, H., et al., 2010: The Eyjafjallajökull eruption in April 2010 – detection of volcanic plume using in-situ measurements, ozone sondes and lidar-ceilometer profiles. *Atmos. Chem. Phys.* **10**, 10085-10092.
- GASTEIGER, J., GROSS, S., et al., 2011: Volcanic ash from Iceland over Munich: mass concentration retrieved from ground-based remote sensing measurements. *Atmos. Chem. Phys.* **11**, 5, 2209-2223.
- GROSS, S., FREUDENTHALER, V., et al., 2012: Dual-wavelength linear depolarization ratio of volcanic aerosols: Lidar measurements of the Eyjafjallajökull plume over Maisach, Germany. *Atmosph. Env.* **48**, 85-96.
- GUFFANTI, M., CASADEVALL, T.J., et al., 2010: 1953–2009: Encounters of aircraft with volcanic ash clouds; A compilation of known incidents. *U.S. Geological Survey Data Series* 545, ver. 1.0, 12 pp. plus 14 appendixes including the compilation database, <http://pubs.usgs.gov/ds/545/>.
- ICAO, 2001: Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds. First Edition. Doc 9691-AN/954 variously paged, accessed March 19, 2012, at <http://www.icao.int/safety/meteorology/iavwopsg/Meeting-Documents/IAVWOPSG-2011/Report/Appendix E.pdf>.
- ICAO, 2007: Manual on Volcanic Ash, Radioactive Material and Toxic Chemical Clouds. Second Edition. Doc 9691-AN/954 variously paged, accessed March 19, 2012, at <http://www.paris.icao.int/news/pdf/9691.pdf>.
- KUEPPERS, U., CIMARELLI, C., et al., 2010: Thermal stability of Volcanic ash versus turbine ingestion test sands: an experimental investigation. *Atlantic Conference on Eyjafjallajökull and Aviation*, Keflavik, Iceland.
- LAVALLÉE, Y., VARLEY, N., et al., 2012: Magmatic architecture of dome-building eruptions at Volcán de Colima, Mexico. *Bulletin of Volcanology* **74**, 249-260.
- LEKKI, J., LYALL, E., et al., 2013: Multi-Partner Experiment to Test Volcanic-Ash Ingestion by a Jet Engine. *6th International Workshop on Volcanic Ash; 11-15 March 2013*, Citeko, Indonesia, GRC-E-DAA-TN8284, 22 pp.
- MAYER, B., KYLLING, A., 2005: Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations - description and examples of use. *Atmos. Chem. Phys.* **5**, 1855-1877.
- PAPPALARDO, G., MONA, L., et al., 2013: Four-dimensional distribution of the 2010 Eyjafjallajökull volcanic cloud over Europe observed by EARLINET. *Atmos. Chem. Phys.* **13**, 8, 4429-4450.
- PETERSEN, G. N., BJORNSSON, H., et al., 2012: The impact of the atmosphere on the Eyjafjallajökull 2010 eruption plume. *J. Geophys. Res.* **117**.
- SAUER, D., GASTEIGER, J., et al., 2013: The Visibility of Airborne Volcanic Ash from the Flight Deck of an Aircraft - The Effect of Clouds in the Field of View. In CAHALAN, R.F., FISCHER, J., Radiation Processes in the Atmosphere and Ocean. *Amer Inst Physics, Melville*, **1531**, 63-66.
- SCHUMANN, U., WEINZIERL, B., et al., 2011: Airborne observations of the Eyjafjalla volcano ash cloud over Europe during air space closure in April and May 2010. *Atmos. Chem. Phys.* **11**, 5, 2245-2279.
- SIEBERT, L., SIMKIN, T., et al., 2010: Volcanoes of the World. Berkeley.
- STOHL, A., FORSTER, C., et al., 2005: Technical note: The Lagrangian particle dispersion model FLEXPART version 6.2. *Atmos. Chem. Phys.* **5**, 2461-2474.
- STOHL, A., PRATA, A.J., et al., 2011: Determination of time- and height-resolved volcanic ash emissions and their use for quantitative ash dispersion modeling: the 2010 Eyjafjallajökull eruption. *Atmos. Chem. Phys.* **11**, 9, 4333-4351.
- SWINDLES, G. T., LAWSON, I.T., et al., 2011: A 7000 yr perspective on volcanic ash clouds affecting northern Europe. *Geology* **39**, 9, 887-890.
- WEINZIERL, B., SAILER, T., et al., 2012a: The Eyjafjalla eruption in 2010 and the volcanic impact on aviation. In SCHUMANN, U., Atmospheric Physics. *Springer-Verlag*, Berlin, Heidelberg.
- WEINZIERL, B., SAUER, D., et al., 2012b: On the visibility of airborne volcanic ash and mineral dust from the pilot's perspective in flight. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, **45–46**, 87-102.
- WIEGNER, M., GASTEIGER, J., et al., 2012: Characterization of the Eyjafjallajökull ash-plume: Potential of lidar remote sensing. *J. Phys. Chem. Earth* **45–46**, 79–86.
- WITHAM, C., WEBSTER, H., et al., 2012: Modelling concentrations of volcanic ash encountered by aircraft in past eruptions. *Atmospheric Environment* **48**, 219-229.